

УДК: 622.06

**В. П. Самодуров<sup>1</sup>, С. Г. Шутин<sup>2</sup>, С. Мансури-Фар<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь<sup>2</sup>ОАО «Белгорхимпром», Минск, Беларусь**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ РАССОЛОВ  
В КАМЕРАХ ПОДЗЕМНОГО РАСТВОРЕНИЯ СОЛЕЙ**

*Введение.* Геотехнологии, основанные на использовании методов подземного растворения солей, используются для добычи магниевых, калийно-магниевых, калийных солей и поваренной соли, а также других полезных ископаемых. Их применяют и для создания подземных емкостей для хранения газа, нефтепродуктов, отходов и др. Известно, что меняя конфигурацию положений водоподающей и рассолозаборной колонн, потока растворителя, а также уровень нерастворителя можно существенно менять ход процессов растворения и форму подземной камеры. Методы расчетов процессов подземного растворения солей в настоящее время недостаточно эффективны, поэтому особое значение приобретает моделирование процессов растворения солей в лабораторных условиях.

*Целью данной работы* является моделирование и изучение динамики движения рассолов в камерах подземного растворения солей для формирования каверн заданной формы и объема. Основное внимание здесь уделяется влиянию минерализации растворителя на форму каверны растворения.

*Методический подход*, примененный в данной работе основан на использовании компьютерного анализа цифровых фотографий потоков рассолов в камерах растворения солей. Потоки в камерах растворения рассолов разной плотности, осложненные явлениями конвекции и диффузии можно визуализировать, используя окрашенный растворитель. Концентрация красителя при смешивании рассолов разной минерализации может быть использована для определения содержания солей в разных участках камеры растворения. Этот подход является разновидностью компьютерной колориметрии цифровых фотографий и аналогичен зарубежному методу Digital Image-Based Colorimetry (DIC).

В данной работе использовалась цилиндрическая прозрачная емкость диаметром 25 см и высотой 45 см, заполненная насыщенным прозрачным рассолом NaCl. Минерализация рассола составляла 328 г/см<sup>3</sup>, с плотностью 1,191 г/л. Высота заполнения емкости была 40 см, а объем рассола составлял 19,5 л. Окрашенный синим красителем растворитель разной минерализации (от 0 до 310 г/см<sup>3</sup>) подавался по трубке малого диаметра на глубину 5 см и 35 см. Эти эксперименты моделируют два основных типа подачи растворителя – верхнюю водоподачу и заглубленную водоподачу. Поток окрашенного растворителя составлял в разных экспериментах от 9 до 21 см<sup>3</sup>/мин. В процессе экспериментов в течение 30 мин проводилось последовательное фотографирование распределения красителя в объеме рассола в режиме «на просвет». Минерализация потоков в этом случае определяется поглощением красителя, так же как и в аналитической колориметрии.

*Результаты.* На рис. 1. показаны этапы распределения пресного окрашенного растворителя в емкости, заполненной насыщенным рассолом в случае верхней водоподачи. Из-за разности плотностей растворителя и рассола, растворитель всплывает к верхней поверхности – нерастворителю, роль которого играет воздух. Можно видеть, что течение растворителя в виде окрашенных струй носит турбулентный характер и имеет две составляющих. Один поток направлен вверх и обусловлен всплытием пресного растворителя (поток вертикального перемещения), а второй – распространением растворителя по верхней поверхности к стенкам сосуда (припотолочный плоскорадиальный поток). Турбулентность потоков обусловлена существенной разницей плотности пресного растворителя и насыщенного рассола. При использовании соленого растворителя турбулентность потоков постепенно уменьшается и переходит в ламинарное течение. Явления диффузии, как это видно на рис. 1, не имеют преобладающего значения

в динамике движения рассолов. За время эксперимента (30 мин) граница между слоями растворителя и рассола диффундировала незначительно.



Рис. 1. Этапы верхней подачи свежего растворителя в насыщенный рассол

При верхней водоподаче растворителя отсутствуют явления конвекции, так как расстояние подъема растворителя к поверхности мало, и, поэтому, поток подъема растворителя не вызывает завихрений и перемешивания рассола, за исключением локальных завихрений внутри турбулентного потока. Наоборот, при заглубленной подаче растворителя возникают конвективные потоки и образуются завихрения трех размеров (рис. 2). Мелкие конвекционные завихрения возникают непосредственно во всплывающем потоке растворителя при минерализации рассолов 10–50 г/л. Средние конвекционные потоки вызывают расслоение рассолов в верхней части емкости. Их минерализация составляет 130–170 г/л. Крупный конвекционный поток связан с циркуляцией рассолов повышенной минерализации вдоль стенок емкости. Минерализация этих рассолов составляет 190–250 г/л. В нижней части емкости при этом сохраняется тороидальная область повышенной минерализации (более 250 г/л). Известно, что в процессе растворения стенок, плотность пристеночного рассола растет. Это вызывает движение вниз пристеночных рассолов и активирует конвекцию в нижней части камеры растворения.

Распределение растворителя в камере с учетом двух основных потоков – потока вертикального движения и припотолочного радиального перемещения можно определить формулой:

$$R_h = \sum_{n=1}^N A_n \exp(-K_n h/H^n) \quad (1)$$

где  $R_h$  – распределение растворителя по глубине  $h$ ,  $n$  – разные типы потоков в составе растворителя,  $A_n$  – радиусы распространения растворителя в потолочине для разных типов потока,  $K_n$  – коэффициенты распределения растворителя для разных потоков.  $H$  – глубина подачи растворителя. На рис. 3, слева представлена диаграмма распределения растворителя в случае верхней водоподачи, а справа – результат эксперимента по растворению керна каменной соли, подвешенной в емкости растворения.

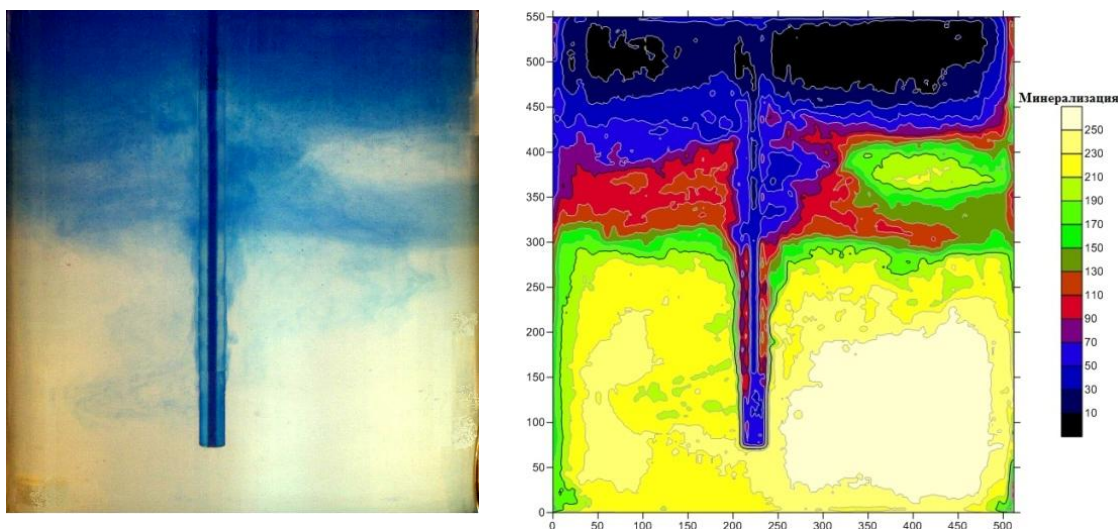


Рис.2. Конвекционные потоки в рассоле при заглубленной водоподаче

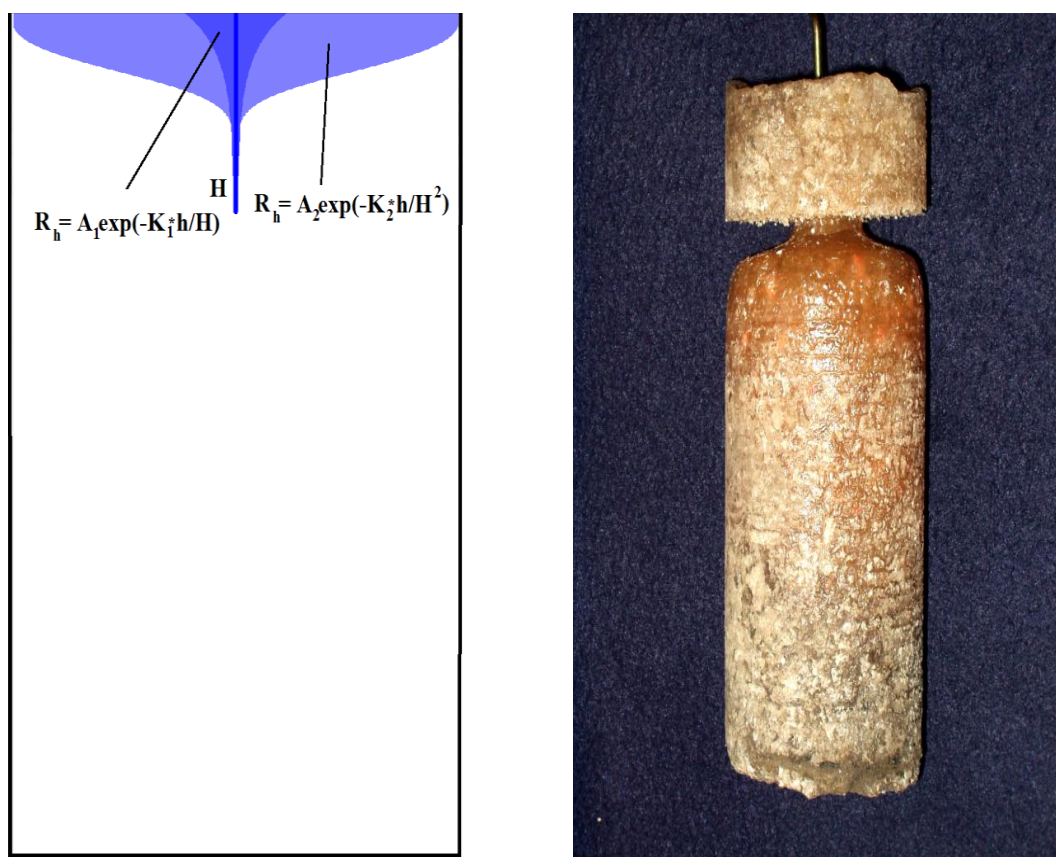


Рис.3. Расчетная диаграмма распределения растворителя (слева) и результат эксперимента растворения керна при верхней водоподаче.

В нижней части емкости, в насыщенном рассоле kern каменной соли не растворяется. Пресный растворитель локализуется в верхней части, у потолочины, и в этой зоне отмечается интенсивное растворение керна. Можно видеть, что профиль растворения керна совпадает с расчетной диаграммой распределения растворителя в случае верхней водоподачи.

*Заключение.* Компьютерная колориметрия цифровых фотографий является эффективным методом анализа потоков растворителя и распределения рассолов в камерах растворения. Метод окрашивания растворителя позволяет определять минерализацию рассолов в объеме камеры и динамику потоков с учетом конвекции и диффузии.

